

## LA ATMÓSFERA Y LAS ESTRELLAS. LAS RELACIONES ENTRE METEOROLOGÍA Y ASTRONOMÍA

**Alberto Cansado Auría**

*Jefe del Servicio de Modelización de la Calidad del Aire  
AEMET - Agencia Estatal de Meteorología*

Cuando hablamos de Meteorología, difícilmente nos paramos a pensar en la relación que mantiene con la Astronomía. A primera vista parecen ciencias muy diferentes y sin relación entre ellas. La una, es el arquetipo de la precisión absoluta: desde que Newton descubrió las leyes que regían el movimiento de los cuerpos celestes, con la poderosa Mecánica Celeste se puede predecir el instante preciso en el que se producirá un eclipse de Sol sobre cualquier punto de la Tierra o el momento en el que desde una localidad podemos ver cómo la Luna oculta una estrella. Mientras tanto, la otra trata de comprender los movimientos de una atmósfera caótica hasta el punto de que un simple aleteo de mariposa pueda llegar a provocar un tornado<sup>1</sup> y es incapaz de pronosticar con fiabilidad si hará Sol o lloverá más allá de cinco o seis días en el mejor de los casos.

<sup>1</sup>El llamado “efecto mariposa” es una metáfora del concepto de sensibilidad a las condiciones iniciales que poseen algunos sistemas dinámicos. Edward Norton Lorenz (1917-2008) fue un meteorólogo americano que descubrió la sensibilidad de la atmósfera a las condiciones iniciales. En 1963 publicó sus conclusiones, en las que manifestaba que un meteorólogo le comentó, al conocer sus resultados, que eso significaba que el aleteo de una gaviota podría cambiar para siempre el tiempo (atmosférico). En sucesivas referencias, Lorenz cambió la gaviota por una mariposa. En 1972, tras fallar a la hora de elegir un título para su charla en la 139 Reunión de la Asociación Americana para el Avance de las Ciencias, Lorenz aceptó el título que le propuso Philip Merilees: “Does the flap of a butterfly’s wings in Brazil set off a tornado in Texas?”. A partir de entonces las referencias a los efectos del batir de alas de la mariposa han sido múltiples. Aunque la referencia al aleteo de la mariposa se han mantenido, la localización de la misma, sus efectos y el lugar en el que los efectos se sienten también han sido muy variados.

Y sin embargo, estas dos ciencias, aparentemente tan diferentes, están ligadas de forma estrecha y, además, sus caminos han circulado paralelos a lo largo de la mayor parte de la historia de la humanidad. A pesar de sus diferencias, sus relaciones son profundas.

La llegada del Neolítico, que no fue simultánea en todos los lugares pero que podemos situar hacia el año 9 500 A.C. en la zona de Oriente Medio, hizo que los hombres dejaran atrás la sociedad nómada de cazadores-recolectores para pasar a ser sedentarios en poblados donde llevaban a cabo actividades agrícolas y ganaderas. Al dar este paso, los ciclos naturales empezaron a cobrar gran importancia en la vida cotidiana de los hombres. Al ciclo diurno, que quizás hasta ese momento fuera el más importante puesto que era el que fijaba el periodo en el que el hombre podía realizar actividades, como la caza, con cierta seguridad, se añadieron otros como el ciclo anual que controlaba los trabajos agrícolas. Nuestros ancestros, que sin duda eran grandes observadores de la naturaleza, no pasaron por alto el hecho de que las regularidades estacionales climáticas, como los ciclos invierno-verano o periodos de lluvias frente a periodos secos, estaban ligadas a los ciclos astronómicos.

Me propongo repasar una serie de temas que nos las harán recordar.

### El clima de la Tierra

Para empezar podemos recordar que la fuente de energía que origina los movimientos del aire en el seno de la atmósfera terrestre, y por lo tanto da lugar a la denominada circulación general atmosférica, es el Sol. Una estrella bastante vulgar de clase “G2 v” y sin ninguna característica que la haga extraordinaria a escala cósmica.

Al igual que el resto de los planetas del sistema solar, la Tierra debe su clima en gran medida a factores astronómicos. Entre esos factores astronómicos que condicionan el clima terrestre podemos citar la distancia de la Tierra al Sol y la inclinación del eje de nuestro planeta. Ellos son, junto a la composición de la atmósfera, los últimos responsables del clima terrestre. De hecho, la palabra griega de la que procede significa inclinación del Sol.

El clima está determinado por el balance de radiación del planeta, es decir, el equilibrio entre la radiación que alcanza la Tierra y la que emite. Existen tres vías para que este balance se altere: por un cambio en la radiación solar que llega a la tierra (hablaríamos de cambios en los parámetros orbitales de la Tierra o cambios en el Sol), por cambios en la fracción de radiación que es reflejada (cambios en el albedo causados por aumentos o disminuciones de la cobertura nubosa, alteraciones en la concentración de aerosoles o cambios en los usos del suelo) y, por último, por alteraciones en la radiación que el planeta emite (hablaríamos en este

caso de cambios en la composición de la atmósfera, por ejemplo en la concentración de gases de efecto invernadero). Los tres factores además están interrelacionados, de forma que existe una retroalimentación entre ellos.

Comencemos analizando los factores astronómicos que condicionan el clima. La inclinación del eje de rotación de la Tierra respecto a la eclíptica (actualmente  $23^{\circ}26'$ ) provoca que a lo largo del año los hemisferios sur y norte tengan una iluminación diferente ocasionando la existencia de las estaciones. La situación se invierte a los seis meses, de forma que la fecha del solsticio que marca el comienzo del verano en el hemisferio norte es también la fecha en la que el invierno comienza en el hemisferio sur y viceversa. Sólo en dos momentos del año, cuando el Sol cruza el plano ecuatorial terrestre en los equinoccios, ambos hemisferios reciben la misma cantidad de luz.

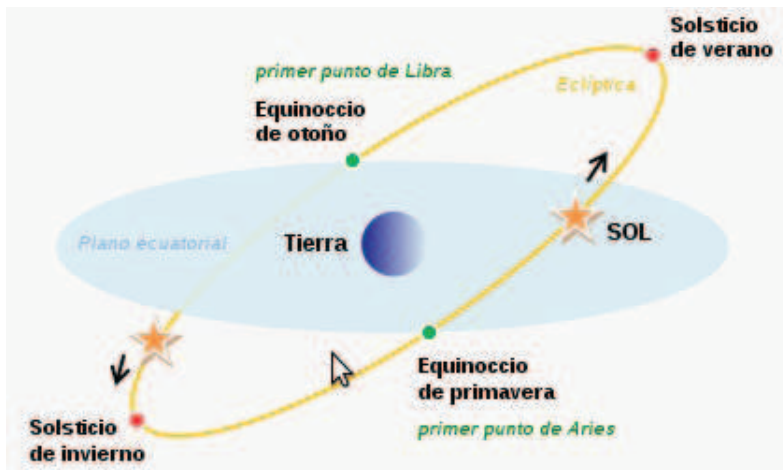


Figura 1: El Sol se mueve aparentemente durante el año sobre la eclíptica (línea amarilla). La eclíptica cruza el plano ecuatorial terrestre en dos puntos (los llamados primer punto de Aries y primer punto de Libra) y este hecho marca los equinoccios (igual duración del día y la noche).

La distancia Tierra-Sol es la adecuada para que, junto a una pequeña ayuda de los gases de efecto invernadero presentes en la atmósfera terrestre, nuestro planeta presente unas condiciones óptimas para que se haya desarrollado la vida tal y como la conocemos.

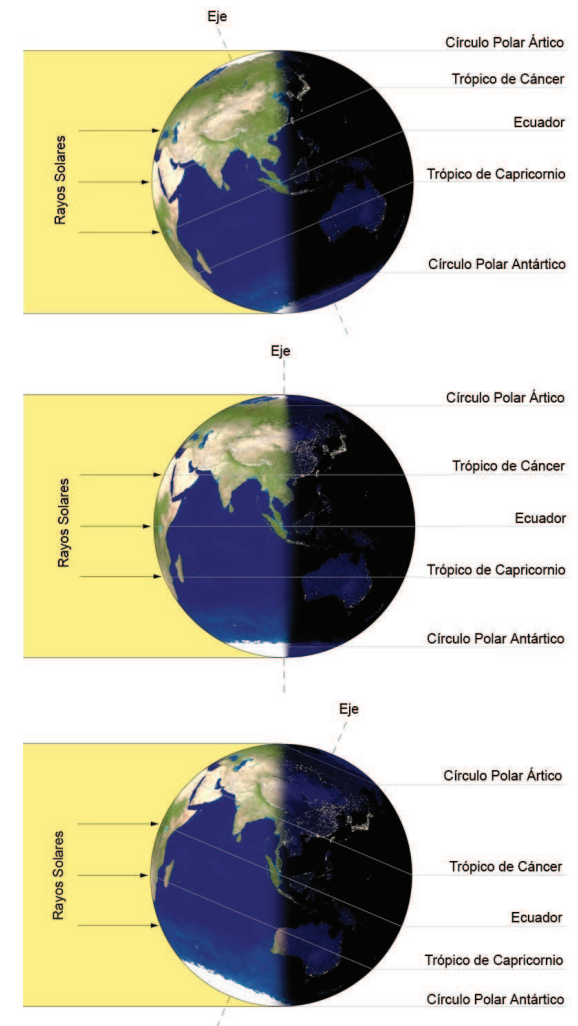


Figura 2: (Arriba) Durante el solsticio de verano (hemisferio norte), el Sol alcanza su máxima elevación y es el día de mayor duración del año. El hemisferio norte recibe la mayor parte de la radiación solar. (Centro) En los equinoccios la duración del día y la noche son prácticamente iguales. Ambos hemisferios están iluminados por igual. (Abajo) Durante el solsticio de invierno (hemisferio norte), el Sol culmina a la menor elevación del año y la duración del día es la más corta. El hemisferio sur recibe la mayor parte de la radiación solar.

Sin embargo, la excentricidad de la órbita de la Tierra en su movimiento de traslación alrededor del Sol no tiene prácticamente influencia en el clima de nuestro planeta ya que actualmente tiene un valor muy pequeño (0,017). De hecho, la diferencia entre las distancias en el perihelio (la máxima aproximación de la Tierra al Sol, 147 millones de kilómetros) y el afelio (el máximo alejamiento de la Tierra al Sol, 152 millones de kilómetros) es de sólo un 3 %. El perihelio tiene lugar los primeros días de enero, en el invierno boreal y el afelio a principios de julio, en el verano boreal.

Pero el clima no ha sido algo constante sino que ha habido variaciones muy significativas a lo largo de la historia de la Tierra. Son los cambios en esos factores astronómicos y sus interacciones con otros factores como el albedo o la composición atmosférica los que nos pueden ayudar a entender el clima en el pasado: la paleoclimatología trata de estudiar el clima de nuestro planeta a lo largo de la historia, sus variaciones y las causas de dichos cambios. Factores como la energía que llega del Sol, la situación astronómica, la distribución de masas de tierra y de agua y la composición de la atmósfera son importantes en paleoclimatología.

Las herramientas a las que recurre la paleoclimatología para averiguar el clima pasado son los denominados *proxies*. Los proxies (climatológicamente hablando) son características físicas del pasado que se han conservado hasta nuestros días en algún soporte y que, indirectamente, están relacionadas con algún elemento del clima. De esta forma, dichos proxies nos permiten reconstruir el clima de la antigüedad.

Existen diferentes proxies: Un análisis de los gases atrapados en un cilindro procedente de glaciares o de hielos polares (Groenlandia, Antártida) nos permitirá conocer cuál era la composición química de la atmósfera en épocas remotas. El espesor de cada capa de hielo de esos cilindros nos ayudará a estimar las precipitaciones anuales. Igualmente los árboles nos proporcionan información del clima antiguo: los vivos, de algunos cientos de años y los fosilizados extienden este periodo de forma muy importante.

Para ir más allá necesitaremos recurrir al análisis geológico de sedimentos o a medidas de algunos isótopos. El  $^{18}\text{O}$  en el coral, por ejemplo, está relacionado con la temperatura del agua del mar. Por otra parte, los fósiles encontrados en los estratos de sedimentos marinos y lacustres nos permiten conocer la flora y fauna existente en diferentes épocas y nos ayudan a saber cuál fue el clima reinante en la época en la que vivieron. Así, si en un estrato encontramos restos fosilizados de flora y fauna tropical deduciremos que el periodo correspondiente fue cálido. Si, por el contrario, encontramos restos de coníferas y de animales como el mamut, concluiremos que el periodo fue frío.

De forma general podemos decir que la confianza y la precisión de estos registros disminuye conforme retrocedemos en el tiempo.

Se han buscado explicaciones a la existencia de periodos cálidos y fríos a lo largo de la historia de la Tierra. Kepler fue el primero en darse cuenta de que las órbitas que describen los planetas alrededor del Sol eran elipses y no circunferencias. Igualmente descubrió que cuando un planeta se encuentra más cerca del Sol (perihelio), su velocidad de traslación es máxima y cuando se encuentra más alejado (afelio) es mínima. Una de las primeras teorías fue postulada por el francés Joseph Adhémar, un matemático que hacia 1842 propuso que la razón por la cual la Antártida estaba cubierta de hielos era que el invierno es más largo en el hemisferio sur, puesto que el invierno austral coincide con la época del año en que la Tierra está en su afelio. De esta forma la suma de las duraciones de las estaciones frías (otoño e invierno) en el hemisferio sur es aproximadamente una semana más larga que la de las estaciones cálidas (primavera y verano). Lo contrario sucedería en el hemisferio norte.

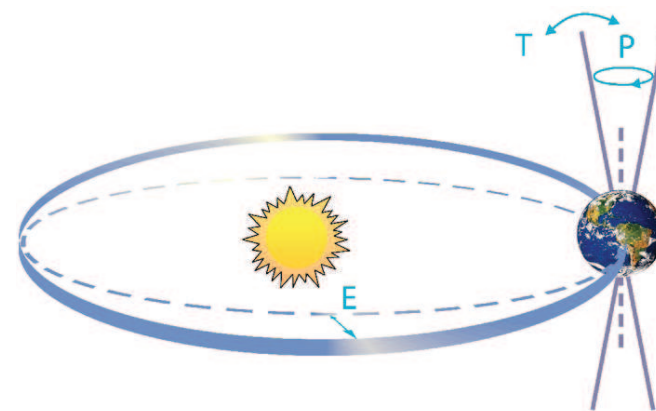


Figura 3: Esquema de los cambios en los parámetros orbitales terrestres. E denota cambios en la excentricidad por variaciones en el eje menor de la órbita, T cambios en la oblicuidad de la órbita y P en la precesión que cambia la dirección de la inclinación del eje. Fuente: IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007.

De acuerdo con Adhémar esta sería la razón por la cual la Antártida se encuentra cubierta de hielo mientras que el hemisferio norte disfruta de unas condiciones más templadas. Adhémar creía que la precesión de los equinoccios (y de los solsticios) haría que unas veces coincidiera con el afelio y otras con el perihelio y esto podría explicar los ciclos fríos que se correspondían con las glaciaciones. Alexander von Humboldt, en 1852 señaló un fallo en el razonamiento de Adhémar: es cierto que el verano es más largo en el hemisferio norte que en el hemisferio sur, pero



si esto sucede es porque la Tierra se halla en ese momento más alejada del Sol y recibe, por tanto, menor insolación. De esta forma, si hacemos un promedio de los periodos primavera-verano y otoño-invierno, ambos efectos se anularían y la insolación que recibirían ambos hemisferios sería idéntica. A pesar del fallo en la teoría que propuso Adhémar, ésta tuvo la virtud de poner el énfasis en las causas astronómicas de los cambios climáticos terrestres y de los ciclos de las glaciaciones.

El siguiente en dar un nuevo paso en la dirección correcta fue el escocés James Croll hacia 1860. Croll fue un científico autodidacta. Nacido en 1821, tuvo que dejar la escuela con 13 años para colaborar con su madre en el mantenimiento de su familia. Tras diversas vicisitudes acabó aceptando el puesto de conserje del Andersonian College and Museum ya que ese trabajo le permitía tener acceso a la biblioteca de la institución. A principios de la década de 1860 empezó a publicar ciertos trabajos científicos. Entre ellos se ocupó de la causa de las glaciaciones, tema éste de gran interés en los círculos académicos de la época. En 1876 publicó un libro llamado *Climate and Time* (El Clima y el Tiempo), en el que sintetizó diez años de investigaciones acerca de las glaciaciones y que le valió su aceptación como “Fellow of the Royal Society”. En esta obra, Croll postulaba que las glaciaciones estarían causadas por la inclinación del eje terrestre, por el ciclo de precesión de los equinoccios que tiene un periodo de unos 26 000 años y por un tercer factor que sería el cambio de forma de las órbitas elípticas debida a las interacciones de los planetas del sistema solar. El astrónomo Urbain Le Verrier había probado que la excentricidad de las órbitas varía periódicamente con un periodo de unos 100 000 años. Pero como hemos visto el hecho de que la órbita sea más o menos excéntrica, no altera la cantidad de calor recibida por la Tierra. Croll pensó que el efecto importante aquí era el equilibrio entre el periodo de calor (verano) y frío (invierno). Según él, un invierno demasiado frío puede causar que se acumule mucha nieve, y esto dar lugar a que gran parte de la radiación que llega a la superficie terrestre se refleje e impidiera que se calentara. Sus ideas resultaron sorprendentemente correctas para la época y no entraban en contradicción con ningún dato conocido en ese momento. Sin embargo, a finales del siglo XIX los geólogos tuvieron evidencias de que el último periodo glaciario había finalizado hacía sólo unos 10 000 años y su teoría se desechó. Su trabajo sirvió como punto de partida para que, ya entrado el siglo XX, Milankovitch propusiera una de las teorías más plausibles sobre el origen de los cambios climáticos en la Tierra: la conocida como “Teoría de Milankovitch”.

Milutin Milankovitch fue un matemático serbio que a principios del siglo XX estudió la relación entre las variaciones conjuntas de los parámetros orbitales de nuestro planeta y los cambios climáticos que han tenido lugar a lo largo del tiempo. A los cambios que ya contenía la teoría de Croll (precesión de los equinoccios y variación de la excentricidad orbital) Mi-

lankovitch añadió un tercer factor: la variación en el ángulo de inclinación de la órbita terrestre (que varía entre un mínimo de  $22^{\circ}1$  y un máximo de  $24^{\circ}5$ ) con un periodo de 41 000 años. Milankovitch estudió cómo los cambios combinados de la excentricidad de la órbita terrestre, la inclinación del eje respecto a la eclíptica y la precesión axial influían en la radiación solar. La tarea no era pequeña en un momento en el que todavía no existían los ordenadores. La contribución clave de Milankovitch fue incorporar la idea del climatólogo Wladimir Köppen de que el factor desencadenante de una glaciación no era tanto una sucesión de inviernos crudos sino una reducción de la insolación en verano. Esta idea es considerada la clave de la teoría astronómica de las glaciaciones.

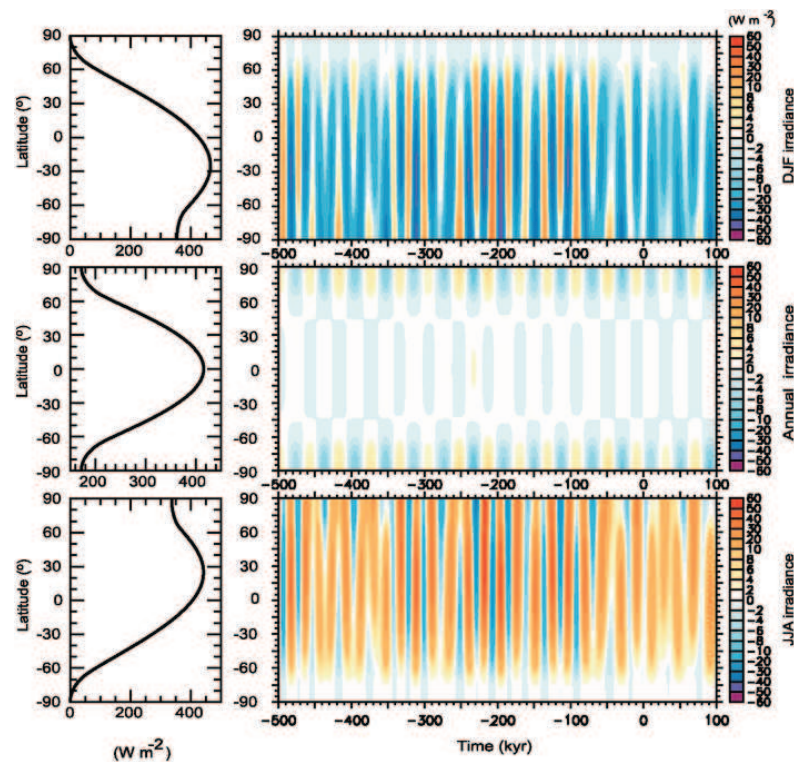


Figura 4: A la izquierda se presenta la distribución de radiación solar incidente actual para los meses de diciembre a febrero (arriba), media anual (centro) y de junio a agosto (abajo). A la derecha, se muestran las variaciones de la radiación respecto a la actual de los últimos 500 000 años y para los próximos 100 000. Fuente: IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007.

Hoy en día, existen evidencias de que las glaciaciones que han tenido lugar en los últimos 3 millones de años en ciclos regulares están ligadas a variaciones regulares con los cambios orbitales de la Tierra alrededor del Sol. Las últimas investigaciones publicadas en el Cuarto Informe de Validación del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (*Climate Change 2007*) realizadas mediante simulaciones con modelos climáticos muestran que la radiación recibida en verano en las zonas continentales del hemisferio norte es crucial a la hora de desencadenar una glaciación. Cuando esta cae por debajo de un valor crítico (algunos autores sitúan el umbral en  $40 \text{ W/m}^2$  menor que la actual a una latitud norte de  $65^\circ$  en verano) la nieve caída el invierno anterior no se derrite y permanece en el suelo. La capa de nieve empieza entonces a acumularse haciendo cada vez más difícil el deshielo y haciendo que la capa de hielo sea cada vez de mayor espesor y extensión.

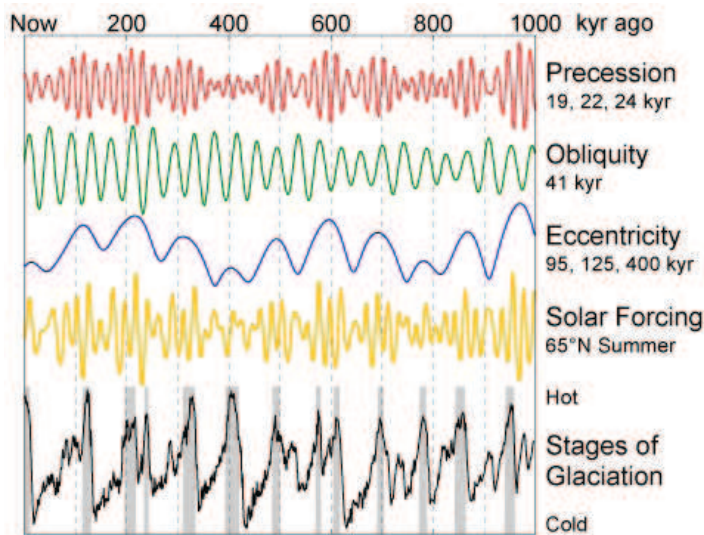


Figura 5: Efectos de la precesión, cambios en la excentricidad de la órbita y de la inclinación del eje de la Tierra en el forzamiento radiativo solar en verano a  $65^\circ$  Norte. Abajo se muestran los periodos cálidos y fríos. La escala de tiempo muestra miles de años.

Según los defensores de esta teoría, estos cambios darían lugar a oscilaciones periódicas (sinusoidales) de diferentes periodos que superpuestos serían los responsables últimos de los cambios por los que ha atravesado el clima terrestre a lo largo del tiempo.

## El Sol y su influencia en el clima

La teoría de Milankovitch nos ha enseñado la importancia que sobre el clima tienen las variaciones estacionales de la energía que incide sobre nuestro planeta, incluso si la energía media a lo largo de un año no varía. ¿Qué pasaría si la cantidad de energía que llega de nuestra estrella varía?. Sabemos que el Sol no es una estrella que se mantiene estática sino que está sometida a variaciones. Unas veces se encuentra calmado, sin apenas actividad, y en otras ocasiones presenta manchas y fulguraciones con tormentas solares que afectan incluso a las transmisiones radio y pueden llegar a dañar satélites artificiales. También sabemos que, normalmente, estos periodos de tranquilidad y actividad se repiten aproximadamente cada 11 años.

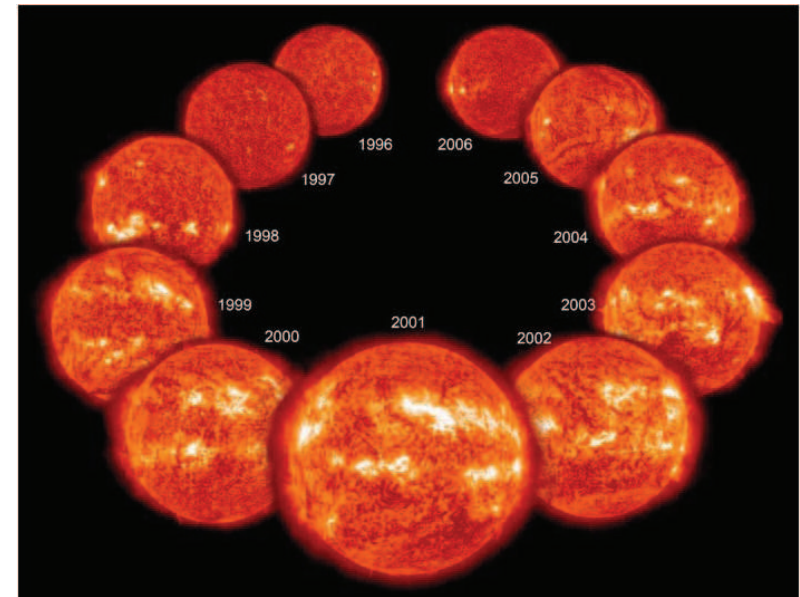


Figura 6: El Solar and Heliospheric Observatory (SOHO) que fue lanzado en Diciembre de 1996, cerca de un mínimo de actividad solar ha monitorizado la actividad del Sol. Desde entonces, ha sido testigo de un ciclo completo con un máximo en torno a 2001-2002 y un nuevo descenso de la actividad desde entonces.

La influencia del Sol sobre el tiempo meteorológico ha sido señalada en la literatura científica a partir de la segunda mitad del siglo XX. Al parecer, se conoce que la actividad de las borrascas que cruzan latitudes

altas ( $> 60^\circ$  Norte) es mayor tras una serie de fulguraciones solares que tienen lugar en un breve espacio de tiempo. Este hecho, señalado por vez primera por Walter Orr Roberts para las borrascas que llegaban a Alaska desde el Pacífico, llamó la atención y empezó a ser investigado con mayor profundidad. Hoy en día los datos observados muestran que una actividad solar intensa sería capaz de inducir modificaciones en los sistemas de bajas presiones en desarrollo unos dos o tres días después.

Sin embargo la sospecha de que existe una relación entre el tiempo y la actividad solar viene de un poco más atrás. A pesar de no conocerse ningún mecanismo físico capaz de explicar la relación entre manchas solares y tiempo, remontándonos a la segunda mitad del siglo XIX, algunos científicos pretendían haber probado relaciones entre el ciclo solar y las cosechas inglesas o el nivel de las aguas en los lagos africanos, aunque siendo sinceros, es dudoso que dichas correlaciones fueran correctas.

A partir de 1970, analizando series históricas de observaciones meteorológicas, a las que se han aplicado técnicas estadísticas sofisticadas, han probado que en ellas existen ciclos de 11 años que pueden explicarse por la influencia de las variaciones de la actividad solar. A pesar de que el efecto es pequeño se ha mostrado que un Sol tranquilo implica una Tierra fría.

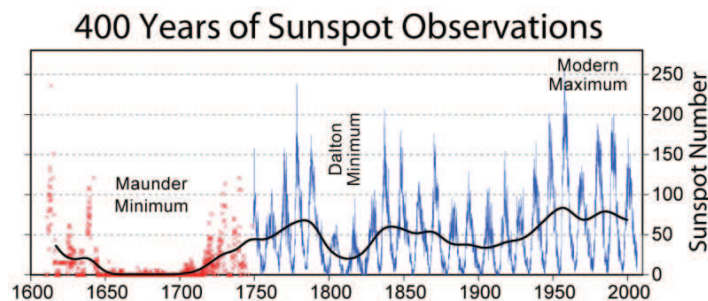


Figura 7: Actividad solar en los últimos 400 años. Desde 1749 existen observaciones mensuales que han sido incluídas. Para el resto del periodo existen observaciones esporádicas que han sido compiladas. Fuente: Solar Influences Data Analysis Center del Real Observatorio de Bélgica.

Una prueba más que apoya esta teoría sería la serie de temperaturas de Europa entre 1645 y 1715. Fueron años muy fríos en los que los canales y los ríos de Gran Bretaña y de Holanda se helaban. Incluso el mar Báltico llegó a helarse por completo permitiendo a los trineos viajar desde Polonia a Suecia. Después de conocer estos hechos no resulta sorprendente saber que esa época, que se conoce como la “pequeña edad del hielo”, fuera un periodo que se correlaciona perfectamente con aquel en el que el Sol

estuvo extremadamente calmado, sin apenas manchas ni actividad, en el denominado mínimo de Maunder.

En consecuencia, el análisis de las series históricas de datos muestran que existe una cierta correlación entre la temperatura y el número de manchas solares (que es la medida más común de la actividad solar). Además hay datos históricos que apoyan estas tesis como la existencia de la “pequeña edad del hielo” que tuvo lugar durante el mínimo de Maunder. Pero aún habría más, estudios climáticos realizados analizando los anillos de los árboles y que permiten remontarnos hasta mil años atrás han mostrado también periodicidades de 11 años que apoyarían también esta hipótesis reforzando su validez.

## La observación astronómica y la meteorología

Existe una obvia relación entre meteorología y observación astronómica. Las condiciones meteorológicas resultan clave a la hora de realizar cualquier sesión de observación. Es evidente que la observación óptica resulta imposible en condiciones de cielo cubierto. Igualmente, las condiciones anticiclónicas que se prolongan en periodos largos de tiempo resultan perjudiciales, ya que la subsidencia del aire en la atmósfera ocasiona que grandes cantidades de polvo se inyecten en la atmósfera haciendo que se torne turbia. Lo mismo ocurre cuando el viento ocasiona intrusiones de polvo procedentes de zonas desérticas, que además de ser perjudiciales para la salud, ocasionan un aumento de la atenuación atmosférica.

Otro aspecto en el que se unen Meteorología y Astronomía, relacionado con el anterior, es la elección de sitios dedicados a la construcción de observatorios. La observación profesional, en la que se invierten millones de euros en equipos muy sofisticados, requiere lugares cuyas condiciones meteorológicas sean especiales. Se suelen buscar emplazamientos situados en zonas elevadas (como cimas montañosas), normalmente por encima de la capa límite planetaria<sup>2</sup> y en los que la humedad sea muy baja. Esas serían las condiciones óptimas para la observación en el rango óptico del espectro, que son las que encontramos, por ejemplo, en el Roque de los Muchachos

<sup>2</sup>Llamamos capa límite planetaria (conocida por sus iniciales en inglés: PBL) a la capa de la troposfera en la que el flujo se encuentra fuertemente influido por la interacción con la superficie de la Tierra y donde son importantes los fenómenos de turbulencia. En esta capa, variables como el viento, la temperatura y la humedad experimentan a menudo variaciones rápidas (turbulencia). Cuando las condiciones son de buen tiempo, la capa límite presenta un ciclo diurno: durante el día, el espesor de la capa límite aumenta y se producen movimientos verticales turbulentos muy importantes. Durante la noche el espesor disminuye, los movimientos verticales se limitan a una capa mucho más fina y aparece con frecuencia una inversión térmica (la temperatura en la superficie es más baja que en niveles más elevados). Normalmente, la contaminación y los aerosoles atmosféricos se encuentran confinados dentro de esta capa límite y por encima de ella se encuentran cielos libres de contaminación que resultan ideales para la observación astronómica.



en la isla de la Palma, Mauna Kea en Hawai o en la sede del Observatorio Europeo Austral situado del desierto de Atacama en Chile.

Pero quizás el aspecto que más limita la observación sea la misma existencia de una atmósfera como la terrestre. La luz es la materia prima del trabajo de los astrónomos y los astrofísicos. Salvo algunas excepciones como la astronomía de partículas (detectores de neutrinos, por ejemplo), los rayos cósmicos o los meteoritos que alcanzan la superficie de la tierra, toda la información que los astrónomos pueden obtener acerca de los objetos que pueblan el universo deben extraerla de la radiación electromagnética que nos llega y es de ahí de donde deben inferir los procesos físicos y químicos que intervienen en la formación y evolución de todos los objetos del cosmos y tratar de pronosticar cuál puede ser su futuro.

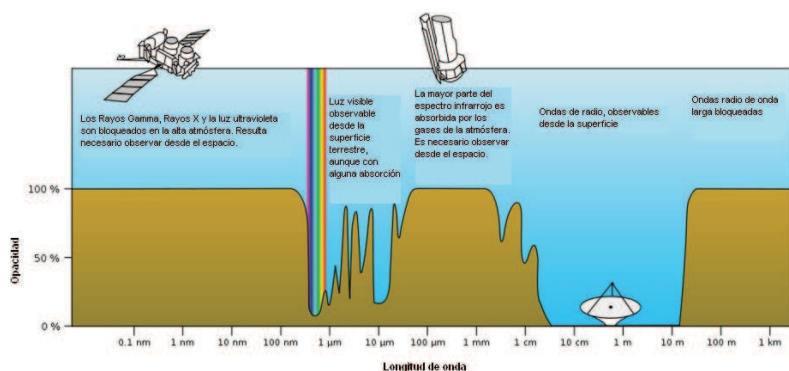


Figura 8: Transmisividad de la atmósfera (opacidad) para las diferentes longitudes de onda.

Esta luz (y hablo de luz en sentido extenso: cualquier radiación del espectro electromagnético) atraviesa el medio interestelar prácticamente sin verse modificada hasta llegar al tope de la atmósfera. Sin embargo, al atravesar los últimos kilómetros de su viaje hasta nosotros, se va a ver drásticamente alterada. Va a sufrir procesos de absorción, atenuación y dispersión por la existencia de la atmósfera. La presencia de determinadas moléculas en el aire que nos rodea hace que la observación astronómica desde la superficie terrestre sea posible sólo en un rango de frecuencias muy pequeño del espectro ya que el resto será absorbido en su totalidad o parcialmente por las diferentes moléculas que componen la atmósfera. Sólo algunas frecuencias especiales en la zona radio (ventana radio) y en una zona con longitudes de onda entre los 400 y los 700 nanómetros aproximadamente (ventana óptica) llegarán prácticamente de forma íntegra hasta la superficie del planeta<sup>3</sup>.

<sup>3</sup>También algunas frecuencias en el infrarrojo logran alcanzar la superficie.

Dicho de otra forma: aunque la extensión del espectro electromagnético es muy grande, la presencia de la atmósfera en nuestro planeta y su composición va a restringir de forma muy importante la cantidad de información que podemos recibir sobre lo que sucede en el Universo.

Durante miles de años, las observaciones astronómicas se habían realizado en la llamada ventana óptica del espectro: en longitudes de onda entre aproximadamente los 400 y los 700 nanómetros. No fue hasta 1931 cuando Karl Jansky demostró que la radiación a una longitud de onda de 14,6 metros, captada con una antena direccional que apuntaba a Sagitario debía proceder de una fuente de origen extraterrestre. En concreto se trataba de emisiones que llegaban del centro galáctico. Con este descubrimiento y el desarrollo posterior de la radioastronomía se amplió el rango de frecuencias que podían ser objeto de estudio.

Para explorar otras zonas del espectro, se hicieron algunos experimentos con instrumentos a bordo de globos que ascendían en la atmósfera pero fue con la llegada de la era espacial y el lanzamiento de satélites artificiales a bordo de los cuales se instalaban instrumentos de observación, cuando definitivamente se extendieron las observaciones a las zonas del infrarrojo, ultravioleta y, más tarde, incluso a rayos X y rayos gamma y ha añadido gran cantidad de información que va desde la estructura interna de las estrellas al origen del universo.

Vemos por lo tanto que, además de las influencias obvias de la meteorología en la capacidad de observación, la composición atmosférica condiciona de forma extraordinaria la cantidad de información que somos capaces de analizar desde la superficie terrestre. Y ha sido una limitación que sólo en el siglo pasado la Humanidad ha sido capaz de superar.

Por otra parte, las limitaciones meteorológicas no sólo se centran a la ventana óptica. En la propagación de las ondas de radio, el vapor de agua presente en la troposfera (0 - 10 km) juega un papel muy importante. Para complicar más todavía, el vapor de agua está muy mal mezclado en la atmósfera y tampoco puede ser medido con precisión. Existen técnicas sofisticadas de observación en radio como la interferometría de muy larga base (VLBI) en la que, para obtener buenos resultados, es necesario tener en cuenta parámetros como el vapor de agua precipitable de la columna atmosférica. Variaciones en la distribución del contenido de vapor de agua pueden originar fluctuaciones de fase que ocasionen una degradación de las medidas.

También la observación en el rango de la radioastronomía submilimétrica (300  $\mu\text{m}$  - 1mm, 300 GHz - 1THz) se ve muy afectada por la humedad. En la figura 9 podemos ver como la presencia de humedad en la atmósfera afecta de forma dramática a la transmisión de la radiación en este rango de frecuencias. Esto hace que la radioastronomía submilimétrica solo sea posible en zonas en las que la humedad es extremadamente baja como la cima de las montañas.

Hoy en día, los modelos numéricos meteorológicos utilizan técnicas variacionales punteras como 4DVAR en los que se integran cientos de miles de observaciones tanto in-situ como procedentes de satélite para producir análisis y reanálisis que describen el estado de la atmósfera de la forma más precisa posible en un instante dado. Estos análisis y reanálisis hoy en día tienen una resolución espacial y vertical muy buena (que además está constantemente mejorando conforme aumenta la capacidad de cálculo) y podrían ser utilizados por los astrónomos profesionales como parámetros de entrada en el análisis de los datos obtenidos en sesiones de observación radio. Además los reanálisis pueden ayudar a determinar el emplazamiento óptimo de unas instalaciones científicas astronómicas dependiendo de las características que se busquen. Estos dos ejemplos serían un claro ejemplo de una posible colaboración futura entre las comunidades astronómicas y meteorológicas.

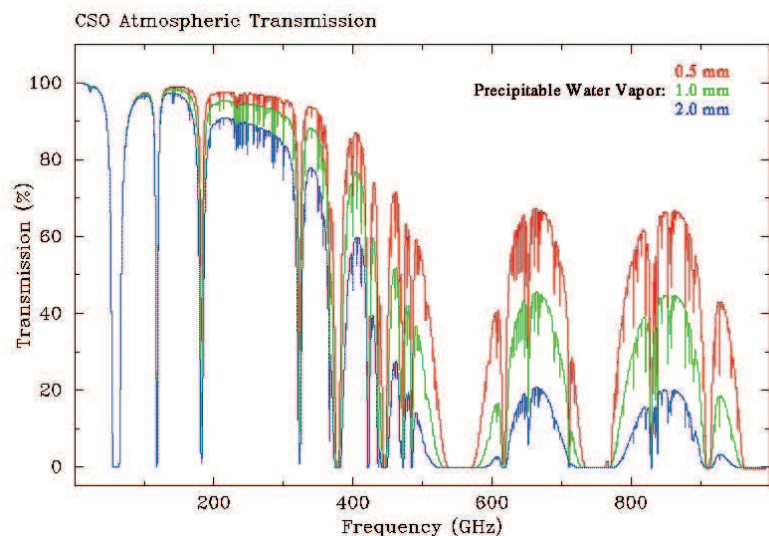


Figura 9: Transmisividad sobre Mauna Kea (Hawai) a determinadas frecuencias en función de la presencia de vapor de agua en la atmósfera. Fuente: Caltech Submillimeter Observatory.

## Meteorología y Astronomía oficiales en España

Centrémonos ahora en la historia de las instituciones científicas españolas relacionadas con las dos ciencias que nos ocupan. La Astronomía también jugó un papel importante en el origen de la Meteorología oficial

en España. A la vuelta de su expedición para medir el grado de meridiano (1735-1744), Jorge Juan propuso al rey Carlos III la creación de un observatorio anexo a la Academia de Guardamarinas en la ciudad de Cádiz que ayudara a la formación de los oficiales a la vez que se atendiera las observaciones y el cálculo de efemérides astronómicas necesarias para la navegación. El Real Observatorio de la Armada de San Fernando (Cádiz) fue fundado en 1753 y, posteriormente, fue trasladado a su emplazamiento actual en San Fernando. Allí se empezaron a tomar medidas meteorológicas. Dichas observaciones meteorológicas se llevaban a cabo con el fin de corregir las medidas astronómicas, pero pronto se observó la utilidad que podían tener las variaciones de la presión atmosférica para predecir el estado del tiempo o la importancia de las variaciones de temperatura en las correcciones de las lecturas de los cronógrafos a bordo de los buques. Esto llevó al Observatorio a establecer un programa sistemático de observaciones meteorológicas en 1789, de modo que el observatorio dispone de una de las series climatológicas más extensas y continuas de España. A partir de 1870 se dio un nuevo impulso a las observaciones, bajo la dirección de D. Cecilio Pujazón. Se adquirieron nuevos aparatos de medidas y se sistematizó la publicación de las mismas dentro de los Anales que, a partir de entonces, se publicarían periódicamente. También se comenzó a organizar un Servicio Meteorológico Costero bajo Real Orden de 1876. Se proyecta una red de estaciones en puertos y observaciones desde buques, pero no se pudo llevar a cabo hasta 1884. Las actividades meteorológicas cesaron en 1888 tras la creación del Instituto Central Meteorológico y el inicio de sus trabajos.

Por otra parte, el Real Observatorio Astronómico de Madrid también realizó observaciones meteorológicas. El Observatorio fue fundado a finales del XVIII, al igual que el Real Observatorio de la Armada, a propuesta de Jorge Juan al rey Carlos III. En 1790 se iniciaron las obras del edificio que sería su sede en el Retiro, diseñado por Juan de Villanueva. Las primeras observaciones meteorológicas datan de esta primera época y eran responsabilidad de los profesores encargados de la Cátedra de Meteorología de la Escuela de Astronomía. El primero de estos profesores fue José Garriga que en 1794 escribió un Curso de Meteorología. Como el edificio de Villanueva se retrasaba, el director de la Escuela de Astronomía, Salvador Jiménez Coronado, decidió instalar un observatorio provisional en el Altillo de San Pablo, y allí se realizan también las medidas meteorológicas hasta que fueron interrumpidas en 1808 debido a la invasión francesa y la guerra de la Independencia. De estas medidas sólo se conserva el cuaderno original de 1803, el resto resultó destruido, pero por éste sabemos que se realizaban tres observaciones diarias a las 8 de la mañana, a las 2 del mediodía y las 10 de la noche y se medían la presión, la temperatura y otras variables como nubosidad y meteoros como las tormentas, nieblas, nieve o la lluvia pero no se anotaba la precipitación.



Jiménez Coronado residió en el extranjero entre 1785 y 1789, año en que regresó debido al estallido de la Revolución Francesa. Él había estado la mayor parte del tiempo en París, pero visitó otros observatorios europeos y allí pudo comprobar la importancia que en los ambientes científicos europeos se otorgaba a la observación meteorológica y la necesidad de disponer de observaciones simultáneas, con métodos uniformes y con instrumentos normalizados.



Figura 10: II Congreso Meteorológico Internacional (1879) al que asistieron los directores del Observatorio Astronómico y Meteorológico de Madrid y del Real Observatorio de San Fernando. Sentado, el segundo por la izquierda es Antonio Aguilar. De pie, detrás de Aguilar se encuentra Cecilio Pujazón.

Sin embargo, como ya se ha mencionado, la invasión francesa truncó de forma abrupta las actividades del observatorio. Tras años de abandono en 1835 se reanudaron las observaciones meteorológicas y en 1840 pasó a depender de la Dirección General de Estudios. Como únicamente se realizaban medidas meteorológicas, pasó a denominarse “Observatorio Meteorológico de Madrid”. Esta situación se prolongó hasta 1851, cuando la Real Orden de 24 de septiembre restableció el Observatorio Astronómico bajo la dirección de Antonio Aguilar y Vela, pero dispuso que el Observatorio también fuera meteorológico. Para dirigir estas actividades se propuso nombrar a un catedrático de Física de la Universidad de Madrid. Posteriormente, en 1858, se unificaron de nuevo ambas secciones y el segundo astrónomo, Miguel Merino, pasó a encargarse de las observaciones meteorológicas.

Otro hito importante fue el Real Decreto de 5 de marzo de 1860, en el que se organiza la recogida coordinada de datos de los observatorios

existentes y se crean otros nuevos, inicialmente bajo la dirección de la Junta General de Estadística del Reino. La realización física de las observaciones la solían realizar los catedráticos de Física de universidades e institutos o se encargaban a órdenes religiosas y debían transmitirse por telégrafo para su recopilación. En 1865, tras reformarse la Junta de Estadística, las actividades meteorológicas pasaron a depender del Ministerio de Fomento que las puso de nuevo bajo la dirección del Real Observatorio Astronómico y Meteorológico de Madrid. La recopilación de datos tenía únicamente un fin estadístico y climatológico, pero en ningún caso se realizaban predicciones. Esta época se prolongó hasta el 11 de agosto de 1887, fecha en la que se publicó el Real Decreto que creaba el Instituto Central Meteorológico con la misión de “calcular y anunciar el tiempo probable a los puertos y capitales de provincia” que ya estaba de acuerdo con la misión de los servicios meteorológicos europeos contemporáneos.

La idea de crear en España un servicio meteorológico similar a los existentes en otros países europeos la tenían hacía ya tiempo científicos como Antonio Aguilar y de Miguel Merino, su sucesor al frente del Observatorio Astronómico a partir de 1882. En 1879 el director del Observatorio Astronómico y Meteorológico de Madrid, Antonio Aguilar y el del Real Observatorio de San Fernando, Cecilio Pujazón, asistieron juntos al II Congreso Meteorológico Internacional. Probablemente, el interés por la creación del servicio meteorológico independiente, se hizo más fuerte a raíz de esta reunión, pero debido a reticencias de las autoridades no pudo lograrlo por lo que Aguilar se quejaría amargamente y murió en 1882 sin ver cumplido su deseo. A mediados de la década de los 80 solamente tres países europeos carecían de un servicio meteorológico dedicado a la predicción del tiempo: Grecia, Turquía y España.

Quien sí intervino en la creación del Servicio Meteorológico en España fue Francisco Giner de los Ríos. Giner de los Ríos no tenía relación alguna con la Meteorología, ni con la Astronomía, pero estaba interesado en cualquier actividad que supusiera el progreso del país. Convenció al Gobierno (del partido liberal) de la necesidad de disponer de un Servicio Meteorológico para informar y predecir el tiempo. Finalmente, como ya hemos dicho, en 1887 un Real Decreto creaba el Instituto Central Meteorológico. A continuación, se creó una comisión para definir las tareas y entre sus miembros estaba el director del Observatorio Astronómico de Madrid, Miguel Merino. A principios de 1888 la comisión emitió su informe y se preparó el programa para la oposición para el puesto de Director.

A dicha oposición se presentó Augusto Arcimis Wehrle, doctor en Farmacia, pero con inquietudes científicas muy amplias. Arcimis había viajado por Europa y conocía varios idiomas. En Londres se empezó a interesar tanto por la Meteorología como por la Astronomía. A partir de 1874 tuvo una intensa actividad astronómica. En su casa de Cádiz instaló

un completo observatorio meteorológico y astronómico. En 1878 publicó su obra “El Telescopio Moderno” en la que introducía técnicas de análisis espectral aplicadas a la Astronomía, por lo que puede ser considerado como un pionero de la astrofísica española, en un momento en que la astronomía oficial se dedicaba en exclusiva a una astronomía descriptiva y de posición. Fue un astrónomo amateur que publicó los resultados de sus observaciones en revistas científicas europeas como la revista de la *Società degli Spettroscopisti Italiani* o el *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* de la que fue nombrado *Fellow*. Luchó por sacar a la ciencia española, y específicamente la Astronomía, de su atraso tomando como ejemplo lo que sucedía en Europa. Se podría decir que fue un visionario que se percató de la necesidad de no perder el tren del progreso justo en el momento en que la industrialización más demandaba una modernización del país. Sus investigaciones y publicaciones le valieron un cierto reconocimiento internacional. Igualmente su defensa de las técnicas espectroscópicas para estudiar la composición química de las estrellas y su aplicación para el estudio de las estrellas fugaces, siendo esta una técnica novedosa que no había sido aplicada por la astronomía oficial, hizo que los astrónomos oficiales sintieran por él una cierta animadversión.

En 1884 se trasladó a Madrid para ser profesor en la Institución Libre de Enseñanza. Y fue Giner de los Ríos quien le convenció para opositar al cargo de Director del recién creado Instituto Central Meteorológico.

Arcimis ganó la oposición y fue nombrado el 19 de marzo de 1888. El primer trabajo de Arcimis consistió en encontrar un lugar adecuado para ser utilizado como sede del Instituto. El emplazamiento elegido fue el edificio conocido como “El Castillo” del Parque del Retiro y que fue cedido parcialmente por el Ayuntamiento de Madrid. Ese mismo año, Arcimis viaja a Inglaterra y Francia para adquirir diversa instrumentación de medida.

Tras diversos avatares, el gobierno conservador decretó su supresión que fue ordenada en abril de 1891 por Real Decreto que derogaba el de su creación. Las instituciones astronómicas (Real Observatorio de Madrid y Real Observatorio de San Fernando) apoyaron su supresión porque, si bien en principio apoyaron la creación del mismo, vieron como les restaba más competencias de las previstas. La supresión se prolongó durante algo más de un año. Tras su restablecimiento en julio de 1892, el 1 de marzo de 1893 el Instituto publicó su primer boletín. Su papel de pionero no se limitó a la Astronomía. En 1895 escribió un pequeño artículo llamado “La circulación atmosférica” en el que se hacía eco de las últimas corrientes en esta materia como por ejemplo los trabajos de Helmholtz en los que postulaba que la circulación debía tener en cuenta la turbulencia horizontal y vertical que condicionaban los cálculos de los flujos de calor y que se presentaban con gran detalle. De esta forma, se convirtió en el introductor en España de la Meteorología dinámica.

Durante algunos años las dificultades continuaron. A la falta de trabajadores (Arcimis, un ayudante y un ordenanza fueron el único personal del Instituto durante ese tiempo) se unió que la observación en provincias continuaron siendo responsabilidad de otros organismos (con instrumentos y métodos de medidas variados) y coordinados por el Observatorio Astronómico que se encargaba también de realizar estadísticas y publicar los resúmenes anuales. Por otra parte, continuó realizando observaciones.



Figura 11: Augusto Arcimis Wherle. Astrónomo amateur y primer director del Instituto Central Meteorológico.

En 1900, tras la supresión del Ministerio de Fomento, tanto el Observatorio Astronómico de Madrid como el Instituto Central Meteorológico pasaron a depender del Ministerio de Instrucción Pública. En 1904, ambos organismos confluyeron dentro del Instituto Geográfico para formar el Servicio Astronómico y Meteorológico. Paradójicamente esta integración fue beneficiosa para el Instituto Central Meteorológico ya que el reglamento despejó dudas y éste asumió todas las actividades relacionadas con la Meteorología desde 1906 que antes tenía asignadas el Observatorio

Astronómico, aunque persistieron los problemas con los observatorios ya que continuaron sin tener competencias sobre los observatorios y sobre los métodos de observación que seguían siendo heterogéneos y separó definitivamente los caminos de la astronomía y la meteorología oficial. Arcimis falleció el 18 de abril de 1910.

A su muerte, y dependiendo el Instituto Central Meteorológico del Instituto Geográfico, se nombró director a un Ingeniero Geógrafo: José Galbis Rodríguez. El progreso que experimentaron la aviación, por un lado, y las ciencias atmosféricas, por otro, proporcionaron un nuevo impulso al Observatorio Central Meteorológico (cambió de nombre en 1911). Se crearon redes pluviométricas y de aerología (con globos que se lanzaban desde el Observatorio Fabra de Barcelona, el de San Fernando, la Sociedad Oceanográfica de Coruña y el Observatorio del Ebro). Entre los años 1910 y 1915 se produjo un desarrollo muy importante del Observatorio Central Meteorológico, generando información y predicciones hasta 24 horas para diferentes zonas que se difundían vía radiotelegráfica. Asumió igualmente las tareas de observación e información aeronáutica de los aeródromos que iban surgiendo y pronto se hizo evidente que resultaba necesario disponer de personal en otras provincias. En 1920 se produjo una reorganización del Instituto, que pasó a denominarse Servicio Meteorológico Español. Se decidió entonces dar la posibilidad de crear centros regionales y observatorios que dependieran directamente del Servicio. Así, antes de 1925 funcionaban 13 observatorios que dependían directamente del SME, entre ellos Alicante, Coruña, Santander y Sevilla. En 1927 se creó el primer centro meteorológico regional en Zaragoza. A pesar de pertenecer al Instituto Geográfico, el Servicio Meteorológico ya había adquirido una cierta independencia funcional que se confirmó con la llegada de la República cuando en 1932 y mediante un Decreto se estableció definitiva y formalmente dicha independencia y puso fin a un largo periodo en los que la Meteorología y la Astronomía españolas habían caminado, administrativamente, de la mano.

## Una estrecha relación

Hemos repasado en este trabajo las relaciones existentes entre dos ciencias que, en principio, parecen tener poco que ver. Pero son factores astronómicos los que condicionan los grandes rasgos de nuestro clima y es el Sol, la estrella más cercana a nosotros, el responsable de los movimientos atmosféricos y de la circulación general atmosférica. Por otra parte, la búsqueda de los mejores emplazamientos para la observación profesional requiere unas condiciones meteorológicas muy concretas y la composición química de nuestra atmósfera condiciona las zonas del espectro electromagnético en las que resulta posible realizar observaciones desde la superficie de nuestro planeta. También resulta necesario tener en

cuenta la presencia (variable) de vapor de agua en la atmósfera a la hora de hacer observaciones en la ventana radio.

Quizás los árboles no nos dejaban ver el bosque o quizás la especialización a la que está sometida hoy la Ciencia nos ha impedido saber hoy lo que nuestros antepasados han conocido durante miles de años: que los vínculos entre Astronomía y Meteorología son profundos y que estas dos ciencias han caminado de la mano a lo largo de toda la Historia de la Humanidad.

## Referencias

A. Anduaga Egaña, *La Regeneración de la Astronomía y la Meteorología españolas: Augusto Arcimis (1844-1910) y el Institucionismo*, Asclepio Vol. LVII-2-2005 (2006).

R. Daley, *Atmospheric Data Analysis*, Cambridge Atmospheric and Space Science Series, Cambridge University Press (1991).

J. M. Giménez de la Cuadra, *La Meteorología en el Observatorio Astronómico de Madrid*, incluido en *Doscientos años del Observatorio Astronómico de Madrid* (1992).

J. Gribbin, *El clima futuro*, Biblioteca científica Salvat número 75, Editorial Salvat (1994).

*Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report: Climate Change 2007*, Contribution of Working Group I: The Physical Science Basis, Cambridge University Press. [http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/publications\\_and\\_data\\_reports.html](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.html).

J. Martín Dávila, J. Gárate Pasquín, A. Pazos García y M. Catalán Morollón, *La Geofísica en el Real Instituto y Observatorio de la Armada en San Fernando*, Física de la Tierra 18, páginas 119-135 (2006).

M. Palomares, *Los noventa primeros años*, incluido en *El Instituto Nacional de Meteorología: Un reto tecnológico*, Centro de Publicaciones del Ministerio de Medio Ambiente (2004).

A.R. Thompson, J.M. Moran, G.W. Jr Swenson, *Interferometry and Image Synthesis in Radio Astronomy*, Wiley-VCH Verlag (2004).

Caltech submillimeter observatory. [http://www.submm.caltech.edu/cso/cso\\_submm.html](http://www.submm.caltech.edu/cso/cso_submm.html).